

การจัดทำข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้าง

อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000

PREPARATION OF PRELIMINARY INPUT DATA FOR STRUCTURAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS USING SAP2000

ชเนษฎา จรัสศรีศรี, ณวพล ทองมาก, ณัฐพล สุจริต*

Chanesda Jaratrassamee, Nawaphon Thongmak, Nattapon Sutjarit*

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อ.เมือง จ.พิษณุโลก ประเทศไทย 65000

Faculty of Industrial Technology, Pibulsongkram Rajabhat University, Muang, Phitsanulok, Thailand, 65000

*Corresponding author e-mail: nattaapon_ce@hotmail.com

วันที่เข้ารับ 2 เมษายน 2569

วันที่แก้ไขบทความ 18 พฤษภาคม 2569

วันที่ตอบรับบทความ 19 พฤษภาคม 2569

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ดำเนินการศึกษาและวิเคราะห์กระบวนการจัดทำข้อมูลเบื้องต้น (Input data) ที่มีความสำคัญต่อความถูกต้องในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000 โดยทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากการจำลองโครงสร้างอาคารกรณีศึกษาภายใต้เงื่อนไขการกำหนดค่าที่แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าการกำหนดคุณสมบัติวัสดุและเงื่อนไขจุดรองรับ (Boundary conditions) ตามมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) อย่างเคร่งครัด ช่วยลดความคลาดเคลื่อนของค่าการเสียรูป (Displacement) ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะการพิจารณาจุดรองรับแบบยึดแน่น (Fixed support) แทนจุดรองรับแบบจุดหมุน (Pinned support) ในโครงสร้างฐานราก นอกจากนี้ งานวิจัยได้ระบุข้อค้นพบสำคัญในการตั้งค่า Load combinations ตามมาตรฐาน ASCE/วสท. ซึ่งหากผู้ใช้งานขาดความเข้าใจในหลักการถ่ายน้ำหนัก (Load path) อาจทำให้ผลการวิเคราะห์แรงภายใน (Internal forces) ผิดพลาดได้ โดยองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ไม่เพียงแต่ช่วยลดข้อผิดพลาดเชิงเทคนิคในการใช้ซอฟต์แวร์ แต่ยังเป็นแนวทางมาตรฐานในการเตรียมข้อมูลนำเข้าเพื่อความปลอดภัยและความประหยัดในการออกแบบโครงสร้างทางวิศวกรรมโยธา

คำสำคัญ: การจัดทำข้อมูลเบื้องต้น, การวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์, การวิเคราะห์โครงสร้าง, เงื่อนไขขอบเขต, ซอฟต์แวร์ SAP2000

Abstract

This research investigates and analyzes the process of preparing preliminary input data, which is essential for ensuring the accuracy of structural analysis of reinforced concrete buildings using SAP2000 software. The study compares the analytical results obtained from simulations of a case-study building structure under different configuration conditions. The findings reveal that strict adherence to material properties and boundary conditions in accordance with the standards of the Engineering Institute of Thailand (EIT) significantly reduces displacement errors. In particular, the consideration of fixed supports instead of pinned supports in foundation structures was found to improve the accuracy of structural behavior predictions. Furthermore, the research identified important findings regarding the establishment of load combinations based on ASCE and EIT standards. A lack of understanding of load path principles may lead to inaccurate internal force analysis results. The knowledge obtained from this research not only helps reduce technical errors in software application, but also provides a standardized guideline for preparing input data to enhance safety and cost-effectiveness in civil engineering structural design.

Keywords: Input data preparation, Finite element method, Structural analysis, Boundary conditions, SAP2000 software

1. บทนำ

ในปัจจุบันการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างอาคารมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามวิวัฒนาการทางสถาปัตยกรรม วิศวกรโยธาจึงหันมาใช้ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ในการคำนวณเพื่อเพิ่มความรวดเร็วและแม่นยำ โดยเฉพาะโปรแกรม SAP2000 ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้หลักการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite element method) ที่ได้รับความนิยมในระดับสากล อย่างไรก็ตามงานวิจัยในอดีตพบว่าความเชื่อถือได้ของผลลัพธ์ (Output) นั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของคุณภาพข้อมูลนำเข้า (Quality of input data) เป็นสำคัญ ดังที่มักเรียกกันในทางคอมพิวเตอร์ว่า "Garbage In, Garbage Out"

อย่างไรก็ตาม ความถูกต้องของผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ (Output) ขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลเบื้องต้น (Input data) ที่วิศวกรป้อนเข้าสู่ระบบเป็นสำคัญ หากกระบวนการจัดเตรียมข้อมูล เช่น การกำหนดคุณสมบัติวัสดุ การจำลองจุดรองรับ หรือการถ่ายน้ำหนักบรรทุกลงบนองค์อาคารมีความคลาดเคลื่อน ย่อมส่งผลให้ผลการวิเคราะห์แรงภายใน (Internal forces) และการเสถียรภาพ

(Displacement) ผิดพลาด ซึ่งอาจนำไปสู่ความไม่ประหยัดในการก่อสร้าง หรือความไม่ปลอดภัยต่อชีวิตและทรัพย์สิน

จากประเด็นปัญหาดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นวิเคราะห์อิทธิพลของกระบวนการจัดทำข้อมูลเบื้องต้นที่มีต่อพฤติกรรมโครงสร้าง ที่รวบรวมขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ตั้งแต่การป้อนข้อมูลลงในโปรแกรมจนไปถึงการนำข้อมูลออกไปใช้ จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อสร้างมาตรฐานการทำงาน ลดความเสี่ยงจากความผิดพลาดของมนุษย์ ช่วยให้กระบวนการวิเคราะห์โครงสร้างเป็นไปอย่างถูกต้องและรวดเร็ว และองค์ความรู้จะเป็นรากฐานสำคัญในการยกระดับมาตรฐานการวิเคราะห์โครงสร้างให้มีความถูกต้อง แม่นยำ และประหยัด ตามหลักวิศวกรรมโยธา

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

2.1 เพื่อจัดทำ คู่มือมาตรฐาน (Standard manual) ในการป้อนข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กด้วยโปรแกรม SAP2000

2.2 เพื่อถ่ายทอดขั้นตอนการจำลองโมเดล (Modeling) และการกำหนดน้ำหนักบรรทุกตามมาตรฐาน วสท. ให้เข้าใจง่ายในรูปแบบ Step-by-Step

2.3 เพื่อทดสอบประสิทธิภาพของคู่มือโดยการนำไปใช้กับอาคารกรณีศึกษาและตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์

3. วิธีดำเนินงานวิจัย (Research methodology)

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ในการวิเคราะห์อิทธิพลของข้อมูลนำเข้าที่มีต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์โครงสร้าง คณะผู้วิจัยได้กำหนดขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยไว้ดังนี้ :

3.1 การรวบรวมข้อมูลและเกณฑ์มาตรฐาน

ศึกษาและรวบรวมทฤษฎีรวมถึงข้อกำหนดทางวิศวกรรมเพื่อใช้เป็นบรรทัดฐาน (Benchmark) ในการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ประกอบด้วย:

- **ทฤษฎีไฟไนต์เอลิเมนต์ (FEM):** ศึกษาพฤติกรรมการส่งถ่ายแรงและการคำนวณความแข็งแรง (Stiffness matrix) ในซอฟต์แวร์ SAP2000
- **มาตรฐานการออกแบบ:** อ้างอิงมาตรฐานวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย (วสท.) และ ASCE 7-22 ในการกำหนดน้ำหนักบรรทุกและการรวมแรง (Load combinations)

3.2 การกำหนดตัวแปรและอาคารกรณีศึกษา (Case study specification)

ผู้วิจัยคัดเลือกอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กพักอาศัยสูง [ระบุจำนวนชั้น เช่น 2 ชั้น] เป็นกรณีศึกษา โดยมีการกำหนดตัวแปรเพื่อใช้ในการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ ดังนี้:



- **ตัวแปรต้น (Independent variables):** การแปรผันเงื่อนไขการจำลองโครงสร้าง ได้แก่:
 1. **ประเภทจุดรองรับ (Boundary conditions):** เปรียบเทียบระหว่างแบบยึดแน่น (Fixed Support) และแบบจุดหมุน (Pinned Support)
 2. **ความละเอียดของโมเดล (Meshing):** การแบ่งชิ้นส่วนองค์อาคารในระดับความละเอียดที่ต่างกัน
 3. **การรวมน้ำหนักบรรทุก (Load combinations):** เปรียบเทียบผลระหว่างการให้น้ำหนักตามกฎกระทรวงและมาตรฐาน ASCE
- **ตัวแปรตาม (Dependent variables):** ค่าที่บันทึกจากการประมวลผล ได้แก่ แรงเฉือนสูงสุด (Max shear), โมเมนต์ดัด (Bending moment) ที่รอยต่อ และค่าการเคลื่อนตัวทางข้าง (Lateral displacement)

3.3 ขั้นตอนการวิเคราะห์และตรวจสอบความถูกต้อง (Verification process)

ดำเนินการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์จากซอฟต์แวร์กับเกณฑ์ทางทฤษฎี โดยมีขั้นตอนดังนี้:

1. **Modeling phase:** สร้างแบบจำลองโครงสร้างตามแบบแปลนสถาปัตยกรรม โดยกำหนดหน่วย (Units) และพิกัดโครงข่ายให้ถูกต้องตามจริง
2. **Verification phase:** ตรวจสอบความสมบูรณ์ของโมเดลผ่านฟังก์ชัน "Check Model" ใน SAP2000 เพื่อป้องกันปัญหาทางเรขาคณิต (Geometric error) และตรวจสอบสมดุลของแรงแรงปฏิกิริยา (Global force balance) ว่ารวมแรงปฏิกิริยามีค่าเท่ากับน้ำหนักบรรทุกที่ป้อนเข้าสู่ระบบหรือไม่
3. **Comparative analysis:** ดำเนินการวิเคราะห์ผล (Run analysis) ภายใต้วัดแปรต้นที่กำหนดไว้ในข้อ 3.2 และนำค่าตัวแปรตามมาลงตารางเปรียบเทียบ (Sensitivity analysis) เพื่อชี้ให้เห็นร้อยละของความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเมื่อมีการตั้งค่า Input data ที่แตกต่างกัน

4. ผลการวิจัย

จากการดำเนินงานวิจัยเรื่องการจัดทำข้อมูลเบื้องต้นในการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม SAP2000 ผู้วิจัยสามารถสรุปผลการดำเนินงานได้ดังนี้:

4.1 ผลการสังเคราะห์แนวทางมาตรฐานการจัดการข้อมูลเบื้องต้น (Standardized input data framework)

จากการดำเนินงานวิจัย ได้สังเคราะห์และจัดลำดับขั้นตอนการจัดการข้อมูลเบื้องต้นเพื่อเป็นบรรทัดฐานในการวิเคราะห์โครงสร้างอย่างเป็นระบบ โดยแบ่งโครงสร้างข้อมูลออกเป็น 5 หมวดหมู่หลักที่มีอิทธิพลต่อความถูกต้องของผลการวิเคราะห์ ดังนี้:

1) การกำหนดระบบหน่วยและพิกัดเรขาคณิต (Units & Grid systems)

ผู้วิจัยพบว่าจุดเริ่มต้นที่สำคัญที่สุดคือการเลือกใช้หน่วยวัดที่สอดคล้องกันทั่วทั้งแบบจำลองแนวทางนี้กำหนดให้ใช้หน่วย SI Units (kN-m) เป็นมาตรฐานหลัก เพื่อลดความคลาดเคลื่อนในการคำนวณค่าพารามิเตอร์เชิงกลอื่นๆ เช่น ค่าหน่วยน้ำหนัก (Unit weight) และค่าความเค้น (Stress) ซึ่งมักเป็นจุดที่ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนหากมีการสลับหน่วยไปมา

2) การนิยามคุณสมบัติวัสดุและคุณลักษณะหน้าตัด (Material & Section definitions)

ผลการศึกษาเน้นความสำคัญของการระบุค่า Modulus of elasticity (E) ให้สัมพันธ์กับกำลังอัดของคอนกรีต ตามมาตรฐาน วสท. ซึ่งพารามิเตอร์นี้ส่งผลโดยตรงต่อค่าความแข็งแรงแรง (Stiffness) ขององค์อาคาร การกำหนดหน้าตัด (Frame sections) ที่ถูกต้องจะช่วยให้การส่งถ่ายแรงระหว่างสมาชิกเป็นไปอย่างสมบูรณ์ตามทฤษฎี

3) การจำลองพฤติกรรมเงื่อนไขขอบเขต (Boundary conditions)

ผู้วิจัยได้กำหนดเกณฑ์การเลือกจุดรองรับให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางกายภาพจริงของโครงสร้าง ได้แก่:

- Fixed support: สำหรับจุดเชื่อมต่อฐานรากที่ต้องการการยึดรั้งทั้งการเคลื่อนที่และการหมุน
- Pinned/Roller support: สำหรับจุดต่อที่ยอมให้มีการหมุนตัวได้อิสระ

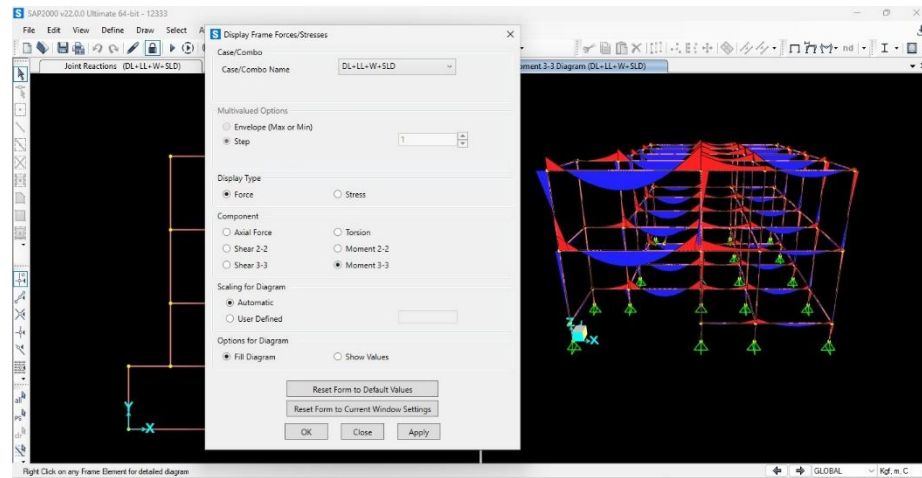
การกำหนดในหมวดนี้มีผลอย่างมากต่อรูปร่างของแผนภาพแรงดัด (Bending moment diagram) ของโครงสร้างส่วนล่าง

4) การจัดกลุ่มและกรณีน้ำหนักบรรทุก (Load patterns & Combinations)

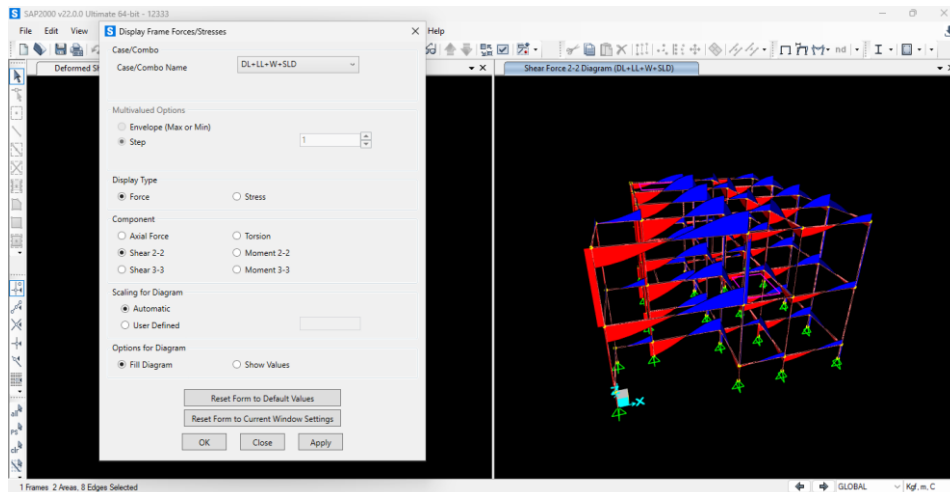
ผู้วิจัยได้รวบรวมและจำแนกประเภทน้ำหนักบรรทุกพื้นฐาน (Dead load และ Live load) พร้อมทั้งกำหนดรูปแบบการรวมแรง (Load combinations) ตามมาตรฐาน มยผ. และ ASCE เพื่อให้ครอบคลุมกรณีวิกฤตที่สุด (Critical case) ที่อาจเกิดขึ้นกับโครงสร้าง

5) กระบวนการตรวจสอบความสมบูรณ์ของแบบจำลอง (Model check)

ส่วนสุดท้ายของแนวทางมาตรฐานคือขั้นตอนการตรวจสอบความต่อเนื่อง (Connectivity) ของจุดต่อและสมาชิก เพื่อยืนยันว่าน้ำหนักบรรทุกทุกสามารถถ่ายเทลงสู่จุดรองรับได้ครบถ้วน (Load path continuity) ก่อนดำเนินการประมวลผลจริง ซึ่งช่วยลดโอกาสเกิดปัญหา Error ในเชิงคณิตศาสตร์ขณะรันซอฟต์แวร์



ภาพที่ 1 ตัวอย่างการวิเคราะห์โมเมนต์โดยโปรแกรม SAP2000



ภาพที่ 2 ตัวอย่างการวิเคราะห์แรงเฉือนโดยโปรแกรม SAP2000

S

Element Forces - Frames

File

View

Edit

Format-Filter-Sort

Select

Options

Units: As Noted

Filter:

	Frame Text	Station m	OutputCase	CaseType Text	P Kgf	V2 Kgf	V3 Kgf	T Kgf-m	M2 Kgf-m	M3 Kgf-m	FrameElem Text	ElemStation
▶	100	0	DL+LL+W+S...	Combination	-15490.88	-96.81	-20.34	-0.44	-35.68	-178.64	100-1	0
	100	0.45	DL+LL+W+S...	Combination	-15442.28	-96.81	-20.34	-0.44	-26.51	-135.07	100-1	0.45
	100	0.9	DL+LL+W+S...	Combination	-15393.63	-96.81	-20.34	-0.44	-17.36	-91.51	100-1	0.9
	100	1.35	DL+LL+W+S...	Combination	-15345.03	-96.81	-20.34	-0.44	-8.2	-47.94	100-1	1.35
	100	1.8	DL+LL+W+S...	Combination	-15296.48	-96.81	-20.34	-0.44	0.93	-4.38	100-1	1.8
	100	2.25	DL+LL+W+S...	Combination	-15247.88	-96.81	-20.34	-0.44	10.11	39.19	100-1	2.25
	100	2.7	DL+LL+W+S...	Combination	-15199.28	-96.81	-20.34	-0.44	19.28	82.75	100-1	2.7
	100	3.15	DL+LL+W+S...	Combination	-15150.63	-96.81	-20.34	-0.44	28.42	126.31	100-1	3.15
	100	3.6	DL+LL+W+S...	Combination	-15102.03	-96.81	-20.34	-0.44	37.57	169.88	100-1	3.6

ภาพที่ 3 ตัวอย่างตารางที่ได้จากการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารโดยโปรแกรม SAP2000

#V2 = ค่าแรงเฉือนที่นำไปใช้

#M3 = ค่าแรงโมเมนต์ที่นำไปใช้

5. สรุปผลและการอภิปรายผล

5.1 สรุปผล

จากการวิจัยและจัดทำคู่มือการจัดเตรียมข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างอาคารด้วยโปรแกรม SAP2000 สามารถสรุปประเด็นสำคัญได้ดังนี้:

1. **การสร้างกระบวนการมาตรฐาน:** ผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการจัดทำขั้นตอนการทำงานที่เป็นระบบ (Systematic workflow) ตั้งแต่การกำหนดพิกัด (Grids), คุณสมบัติวัสดุ (Materials), องค์อาคาร (Frame sections), ไปจนถึงการรวมน้ำหนักบรรทุก (Load combinations) ตามมาตรฐานวิศวกรรม
2. **การวิเคราะห์ความสมเหตุสมผลทางวิศวกรรม (Engineering Check):** นอกจากการตรวจสอบความถูกต้องของตัวเลข (Numerical accuracy) ผลการวิจัยยังพบว่าคู่มือนี้ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถสร้างแบบจำลองที่มี "พฤติกรรมโครงสร้าง" สอดคล้องกับทฤษฎีการออกแบบมากขึ้น เช่น การตรวจสอบแผนภาพแรงดัด (Bending moment Diagram) และแรงเฉือน (Shear force diagram) ที่มีความต่อเนื่อง ณ จุดต่อ (Nodes) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าการกำหนดความสัมพันธ์ของชิ้นส่วน (Connectivity) และการถ่ายน้ำหนักบรรทุก (Load path) ถูกต้องตามหลักวิชาการ
3. **ประสิทธิภาพการเรียนรู้:** การมีคู่มือลำดับขั้นตอนที่ชัดเจน ไม่เพียงแต่ช่วยลดความผิดพลาด แต่ยังช่วยลดระยะเวลาในการตรวจสอบโมเดล (Model verification) ลงอย่างมีนัยสำคัญ เหมาะสำหรับนิสิตนักศึกษาและวิศวกรจบใหม่ที่ยังขาดประสบการณ์ในการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ (Engineering sense)

5.2 การอภิปรายผล

จากการวิจัยพบว่า "ความเข้าใจในพฤติกรรมโครงสร้าง" มีความสำคัญมากกว่าการป้อนข้อมูลตามคำสั่งเพียงอย่างเดียว การอภิปรายผลสามารถสรุปได้ดังนี้:

- **ความสมเหตุสมผลทางวิศวกรรม (Engineering sense):** การใช้แนวทางมาตรฐานช่วยให้ผู้ใช้งานไม่มองโปรแกรมเป็นเพียง "Black box" แต่สามารถอธิบายได้ว่าเหตุใด Moment diagram ถึงมีรูปร่างเช่นนั้น ซึ่งเป็นการตรวจสอบความถูกต้องด้วยความเข้าใจทางทฤษฎี แทนการพึ่งพาตัวเลขจากโปรแกรมเพียงอย่างเดียว
- **การลดความผิดพลาด:** งานวิจัยนี้ยืนยันว่าการมีขั้นตอนตรวจสอบจุดต่อ (Connectivity check) และการตรวจสอบหน่วย เป็นจุดวิกฤตที่ช่วยป้องกันความเสียหายเชิงโครงสร้างที่อาจเกิดขึ้นจากการออกแบบที่ผิดพลาด

6. ข้อเสนอแนะ

1. การขยายผลสู่โครงสร้างซับซ้อน : ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมในโครงสร้างที่มีความไม่สม่ำเสมอ (Irregular structures) หรือโครงสร้างสูงที่ต้องพิจารณาแรงลม (Wind load) และแรงแผ่นดินไหว (Seismic load)
2. การตรวจสอบด้วยโปรแกรมอื่น : ควรมีการทำ Cross-Verification ร่วมกับซอฟต์แวร์อื่นๆ เช่น ETABS หรือ Robot structural analysis เพื่อยืนยันความแม่นยำของกระบวนการ Input data ในระดับสากล
3. การวิเคราะห์พฤติกรรมไม่เชิงเส้น: ในอนาคตควรศึกษาการจัดทำข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์แบบ Nonlinear (P-Delta analysis) เพื่อความปลอดภัยในโครงสร้างที่รับน้ำหนักบรรทุกสูง

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงได้ด้วยดีด้วยความกรุณาจาก อาจารย์ณัฐพล สุจริต อาจารย์ที่ปรึกษา ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา ข้อเสนอแนะ ตลอดจนช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องรูปเล่ม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อความสมบูรณ์โครงงาน ขอขอบคุณคณาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมโยธาทุกท่านนำโดย อาจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ วรรณภา อาจารย์จิรา ธรรมนิยม และอาจารย์วรรณิกา ชันคำ นันตะ สำหรับวิชาความรู้และการอบรมสั่งสอน

ขอขอบคุณผู้บริหารและเจ้าหน้าที่ของสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่อำนวยความสะดวกต่าง ๆ ตลอดระยะเวลาในการเรียนและการทำวิจัย

8. เอกสารอ้างอิง

- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2550). **กฎกระทรวงกำหนดแรงลมและแรงแผ่นดินไหวที่กระทำต่ออาคาร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.
- กรมโยธาธิการและผังเมือง. (2565). **กฎกระทรวงกำหนดการรับน้ำหนัก ความต้านทาน และความคงทนของอาคาร**. กรุงเทพฯ: กระทรวงมหาดไทย.
- กระทรวงมหาดไทย. (2522). **พระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522**. กรุงเทพฯ: ราชกิจจานุเบกษา.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ก). **มาตรฐานการออกแบบคอนกรีตเสริมเหล็ก**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ.
- วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ข). **มาตรฐานการออกแบบโครงสร้างเหล็ก (มยผ. 1227-51)**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ.

วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. (2561ค). **มาตรฐานการออกแบบอาคาร
ต้านทานแรงลม (มยพ. 1311-50)**. กรุงเทพฯ: วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย.

American Society of Civil Engineers. (2022). **Minimum Design Loads and Associated
Criteria for Buildings and Other Structures (ASCE 7-22)**. Reston: ASCE.

Computers and Structures, Inc. (2023). **SAP2000 Integrated Software for Structural
Analysis and Design: User Manual**. Berkeley: CSI.

Hibbeler, R. C. (2017). **Structural Analysis** (10th ed.). New York: Pearson Education.

Kassimali, A. (2015). **Structural Analysis** (5th ed.). Stamford: Cengage Learning.

SAP2000 Documentation. (2023). **CSI Analysis Reference Manual**. Retrieved
from <https://www.csiamerica.com>

Segui, W. T. (2018). **Steel Design** (6th ed.). Boston: Cengage Learning.